

フォトリック結晶レーザーの高輝度(1GWcm⁻²sr⁻¹)単一モード連続動作の実現

—スマート製造を始めとする各種分野のゲームチェンジに向けて—

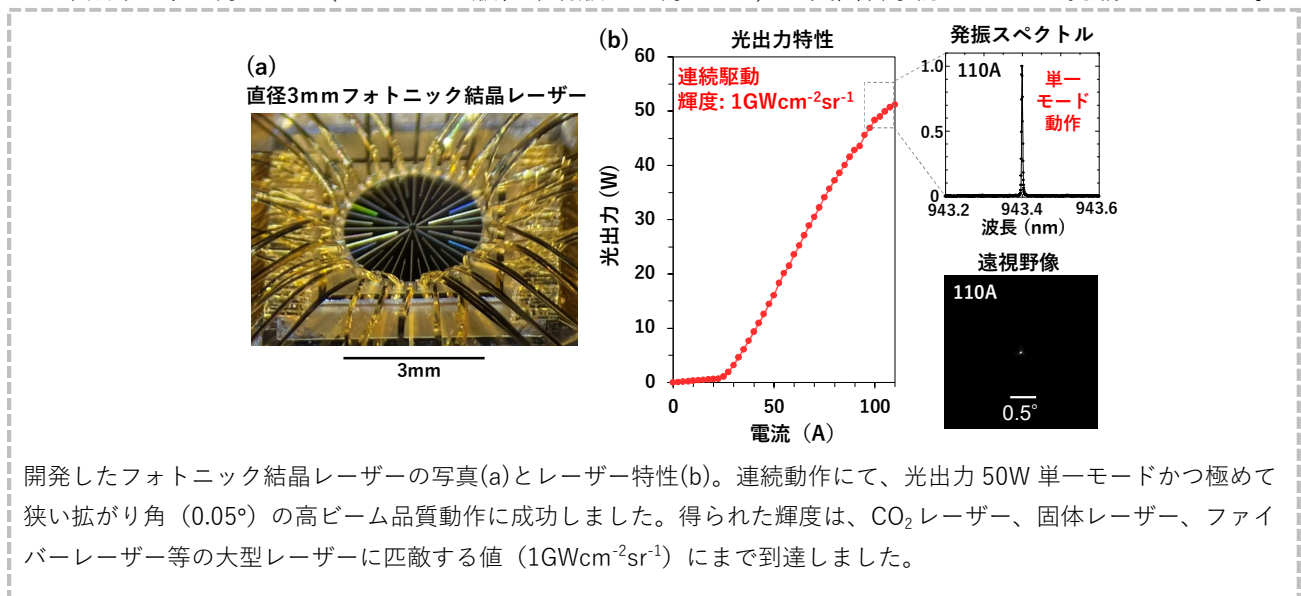
概要

京都大学工学研究科の野田進 教授、吉田昌宏 同助教、勝野峻平 同博士課程学生、井上卓也 同助教らのグループは、フォトリック結晶レーザー (PCSEL) ^{注1)}の連続動作状態での輝度を、CO₂レーザー、固体レーザー、ファイバーレーザー等の大型レーザーに匹敵する値、1GWcm⁻²sr⁻¹まで高めることに成功しました。ここに、輝度は、単位面積、単位立体角当たりの光出力と定義され、金属等の物体の光による切断・加工 (以後「光加工」)を行うためには、1GWcm⁻²sr⁻¹の輝度を実現する必要がありました。本成果は、大型、低効率、高コストという欠点をもつ大型レーザーを、小型、高効率、低コストという利点をもつ PCSEL にて一新可能な段階に達したことを示すものと言えます。このような高輝度 PCSEL の実現は、他の様々な多くの分野にもゲームチェンジをもたらすものと期待されます。

スマート製造 (=デジタル化による自動的かつ効率的なものづくり) の分野においては、デジタル化に適した小型、高効率、低コストな半導体レーザーによる光加工の実現が望まれてきました。しかしながら、既存の半導体レーザーは、高出力時のビーム品質劣化により、高い輝度が得られないという本質的な欠点を抱えており、大型レーザーに匹敵する輝度を実現することが困難でした。研究グループは、高出力・高ビーム品質 (=高輝度) 動作可能という特長を有する新たな半導体レーザーである PCSEL を、1999 年に発明して以来、輝度増大に取り組み^{注2,3)}、極最近、フォトリック結晶内部における光波の結合状態を精密制御することで、直径 3mm の PCSEL で 50~100W 級動作、輝度 1GWcm⁻²sr⁻¹の実現が可能であることを理論的に示しました^{注4)}。さらに、直径 10mm の PCSEL により、一桁高い出力、輝度も可能なことをも示しました。

今回、研究グループは、上記の設計指針に基づく光波の結合状態の制御とともに、制御された光波結合状態を、光加工に必須な連続動作 (発熱の影響を大きく受ける動作状態) においても維持可能な構造を導入した直径 3mm の PCSEL を開発しました。その結果、連続動作において、50W 単一モード・狭ビーム出射角 (0.05°) 高ビーム品質動作を実現し、大型レーザーに匹敵する輝度 (1GWcm⁻²sr⁻¹) を世界で初めて達成することに成功しました。

本成果は、6月14日 (オンライン版、印刷版は6月22日) に英国科学誌 Nature に掲載されました。



1. 半導体レーザーの高輝度化のためのポイント

既存の半導体レーザーの輝度が増大出来ない根本的な原因は、光出力を増大するために、デバイス面積を拡大した際に、共振モード（電磁界分布）に複数の腹をもつ高次モードが発生し、ビーム品質が劣化することに起因します。研究グループは、この欠点を克服するための新たな半導体レーザーとして、図1(a)に示すフォトニック結晶レーザー（PCSEL）^{注1)}を提案し、その開発を進めてきました。その過程で、図1(b)の左図に示すように、楕円孔と円孔をもつ2つの正方格子フォトニック結晶を、距離 d （凡そ、4分の1波長程度）ずらして重ねた「二重格子フォトニック結晶」と呼ぶ、新たなフォトニック結晶構造を考案しました^{注2,3)}。さらに、この構造を用いて、PCSELの面積を拡大した際にも、高次モードの発生を抑制可能な方法について検討しました^{注4)}。具体的には、図1(c)に示すように、中央に腹をもつ基本モードと、端部に腹をもつ高次モードの光出射の方向が異なることに注目し、高次モードに対する放射損失をより大きくすることを検討しました。そのため、図1(b)の左図に示す二重格子構造における距離 d の微調整と、楕円孔と円孔の大きさのバランスの微調整により、面内光回折効果を弱め、図1(b)の右図に示すように、放射波（レーザー出力光）を介した面内光回折効果をも微調整することで、全体的な面内回折効果を弱めることとしました。その結果、図1(d)に示すように、放射損失の出射角度依存性が、より急峻なものとなり、垂直方向に出射する基本モードの損失は小さく保ったまま、斜め方向に出射する高次モードの損失のみを増大し、高次モードの発生を抑えることが可能になることが理論的に判明しました。

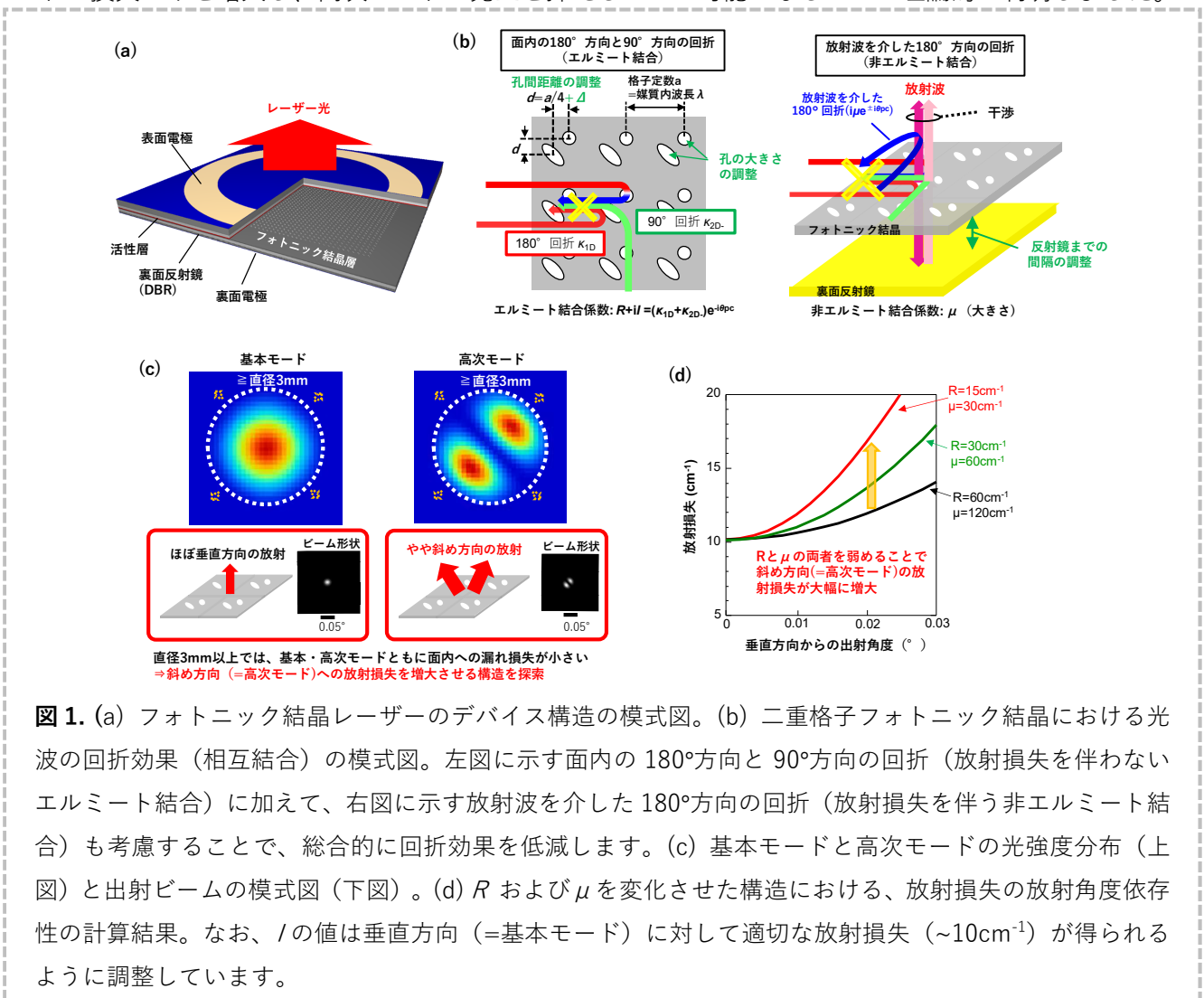


図1. (a) フォトニック結晶レーザーのデバイス構造の模式図。(b) 二重格子フォトニック結晶における光波の回折効果（相互結合）の模式図。左図に示す面内の180°方向と90°方向の回折（放射損失を伴わないエルミート結合）に加えて、右図に示す放射波を介した180°方向の回折（放射損失を伴う非エルミート結合）も考慮することで、総合的に回折効果を低減します。(c) 基本モードと高次モードの光強度分布（上図）と出射ビームの模式図（下図）。(d) R および μ を変化した構造における、放射損失の放射角度依存性の計算結果。なお、 I の値は垂直方向 (=基本モード) に対して適切な放射損失 ($\sim 10\text{cm}^{-1}$) が得られるように調整しています。

以上の説明の定量的表現として、図1(b)の左図に示す、面内の90°、180°回折に起因する光波の面内光結合をエルミート結合と呼び、この結合係数の実部を R 、虚部を I と表します。また、図1(b)の右図に示す、放射波（出力光）を介した180°回折に起因する光波の面内光結合を、非エルミート結合と呼び、この結合係数の大きさを、 μ で表します。図1(d)は、 I を適切な値に設定しつつ、 R と μ の値を共に減少さ

せることで、基本モードの放射損失を小さく保ったまま、高次モードに対応する角度の放射損失のみ大きく出来ることを示しています。その結果、直径 3mm の PCSEL にて、50~100W 級の単一モード動作が可能になり、輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ の実現が期待出来ることが明らかになりました。

2. PCSEL の高輝度($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)単一モード連続動作の実現

以上のポイントに基づき、図 1(b)左図に示す距離 d と、楕円孔と円孔の大きさのバランスの調整によりエルミート結合係数 R 、 l を、また、図 1(b)右図に示すフォトニック結晶と裏面反射鏡の距離を調整することにより非エルミート結合係数の大きさ μ を制御し、図 1(d)の緑線~赤線に示す特性が得られるように工夫しました。こうして、直径 3mm の PCSEL を作製しました。その写真を図 2(a)にします。まず、作製した PCSEL について、フォトニックバンド構造及び放射特性の詳細測定を行い、結合係数を実験的に評価しました^{注5)}。その結果、 $R\sim 15\text{cm}^{-1}$ 、 $l\sim 25\text{cm}^{-1}$ 、 $\mu\sim 38\text{cm}^{-1}$ と、狙い通りの結合係数が実現出来ていることが確認出来ました。次に、本デバイスのレーザー発振特性を、まず熱の影響を受けないパルス状態かつ低電流領域で評価しました。図 2(b)に示す電流-光出力特性から、電流値 $\sim 20\text{A}$ でレーザー発振が得られていることが分かります。レーザー発振時の遠視野像とその強度プロファイルを図 2(c)、(d)にそれぞれ示します。図より、極めて狭いビーム拡がり角 ($\sim 0.05^\circ$) での発振が得られていることが分かります。これは、上述のように、面内回折効果の適切な低減 (結合係数 R と μ を同時に低減) によって、直径 3mm という、半導体レーザーでは、極めて大きな面積において、基本モードのみでの動作が実現出来ていることを示しています。

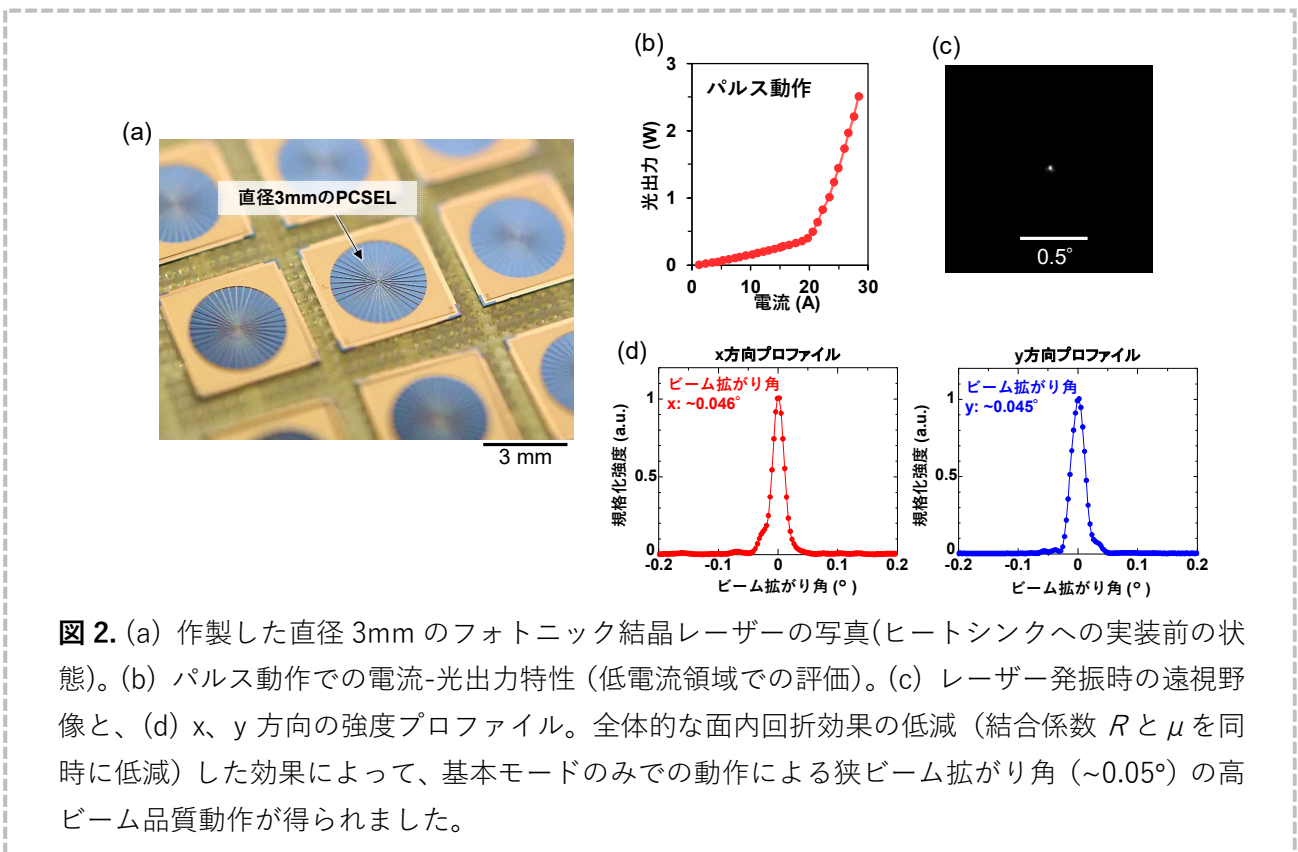
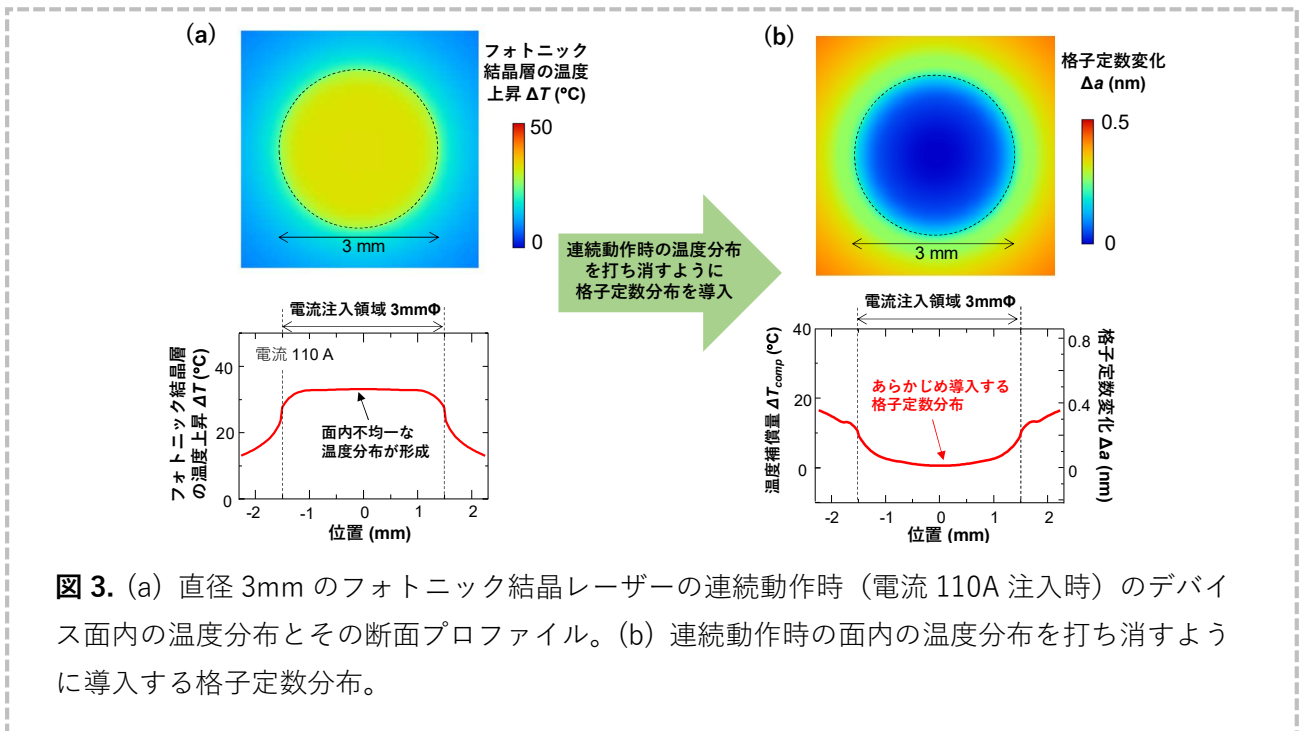


図 2. (a) 作製した直径 3mm のフォトニック結晶レーザーの写真(ヒートシンクへの実装前の状態)。(b) パルス動作での電流-光出力特性 (低電流領域での評価)。(c) レーザー発振時の遠視野像と、(d) x、y 方向の強度プロファイル。全体的な面内回折効果の低減 (結合係数 R と μ を同時に低減) した効果によって、基本モードのみでの動作による狭ビーム拡がり角 ($\sim 0.05^\circ$) の高ビーム品質動作が得られました。

続いて、以上のような直径 3mm の PCSEL の基本モードでの高ビーム品質動作を、光加工に必須な連続動作かつ高電流注入状態 (発熱の影響を大きく受ける動作状態) においても維持するための工夫について説明します。PCSEL に連続的に電流注入することで動作させる際には、図 3(a)に示すように、デバイスの発熱に伴い、フォトニック結晶層面内に温度分布が生じます。ここで、フォトニック結晶を形成する半導体材料の屈折率は温度によって変化するため、屈折率にも面内分布が生じます。これにより、フォトニック結晶内部において、伝搬・回折される光が感じる実効的な空孔周期が面内で不均一となります。その結果、上述のように適切に制御された光の回折効果が乱されることで、基本モード動作が阻害される

要因となり得ます。そこで、図 3(b)に示すように、温度上昇に伴う不均一性を打ち消すように、温度が高く、屈折率が大きくなる中央部分ほど、フォトニック結晶の空孔周期（格子定数 a ）をあらかじめ短くするように、格子定数分布を与えます。こうすることで、面内温度分布の影響が補償され、連続動作時においても、実効的に均一なフォトニック結晶が維持されることで、基本モード動作が期待出来ます。



以上で述べた、面内回折効果の適切な低減（結合係数 R と μ を同時に低減）と、それを連続動作においても維持するための面内格子定数分布の導入の両方を取り入れた、新たな直径 3mm のフォトニック結晶レーザーを作製しました。作製したデバイスを連続動作のためにヒートシンクへと実装した写真を図 4(a)に示します。図 4(b)-(d)に本デバイスの連続動作時のレーザー発振特性の評価結果を示します。まず、同図(b)の光出力特性に示されるように、最大で 50W を超える光出力を達成することに成功しました。さらに、この時の発振スペクトルと遠視野像を同図(c)と(d)にそれぞれ示します。これらの図より、基本モードでの単一モード動作を達成し、極めて狭いビーム拡がり角($\sim 0.05^\circ$)の高ビーム品質動作が実現出来ていることが確認されました。これは、導入した格子定数分布により、温度上昇に伴う屈折率分布がちょうど相殺され、基本モード動作を可能とする適切な面内光回折効果が、高出力連続動作時においても維持されていることを示しています。これにより単一チップの半導体レーザーにおいて、大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ (=光加工に必要とされる輝度) が達成されました。以上の成果は、大型、低効率、高コストという欠点をもつ大型レーザーを、小型、高効率、低コストという利点をもつ半導体レーザーにて一新可能な段階に達したことを示すものと言えます。

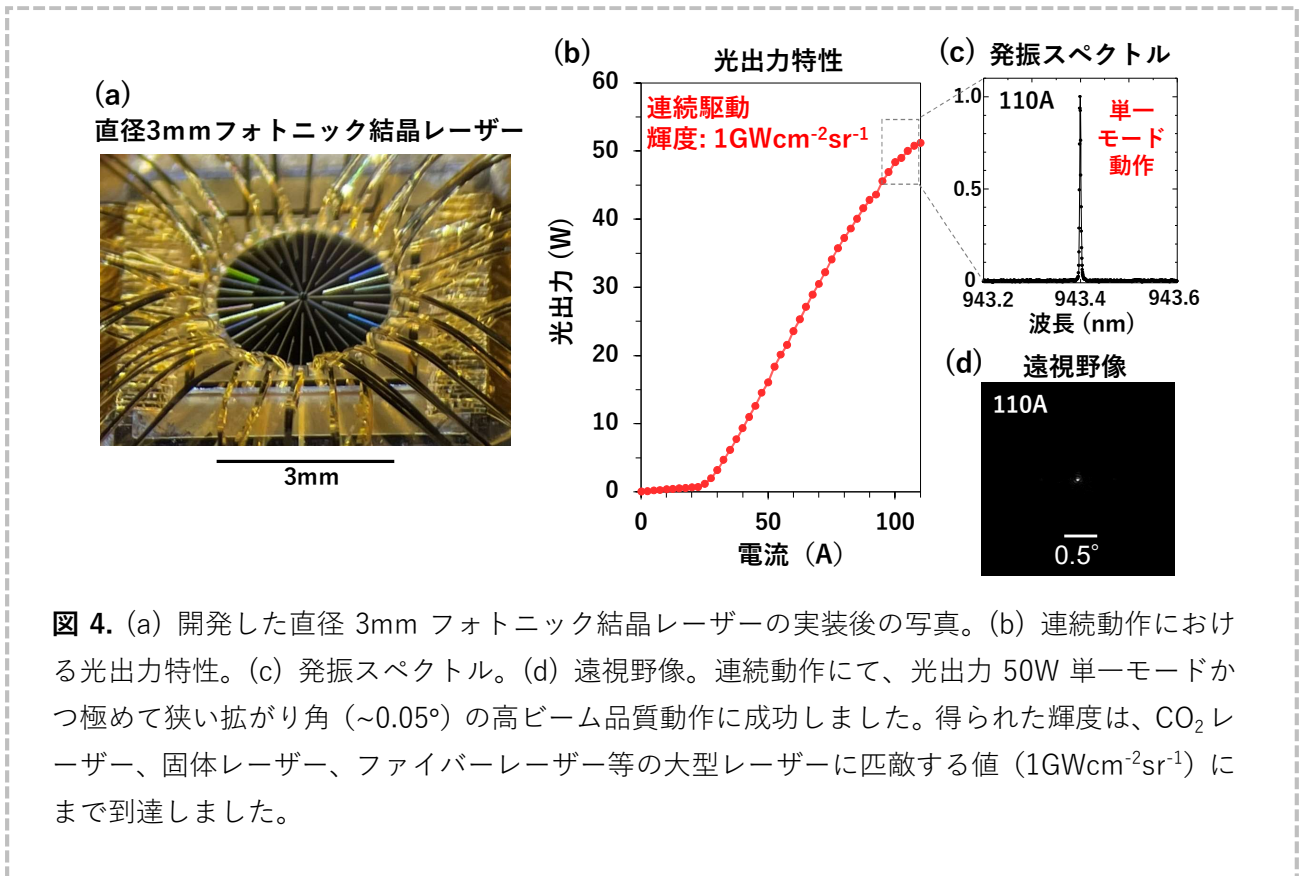


図 4. (a) 開発した直径 3mm フォトニック結晶レーザーの実装後の写真。(b) 連続動作における光出力特性。(c) 発振スペクトル。(d) 遠視野像。連続動作にて、光出力 50W 単一モードかつ極めて狭い拡がり角 ($\sim 0.05^\circ$) の高ビーム品質動作に成功しました。得られた輝度は、 CO_2 レーザー、固体レーザー、ファイバーレーザー等の大型レーザーに匹敵する値 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) にまで到達しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究によりフォトニック結晶レーザー単体で、 CO_2 レーザー、固体レーザー、ファイバーレーザー等の大型レーザーに匹敵する輝度 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) が実現されました。今後、今回設計したフォトニック結晶構造のままで、デバイス面積を直径 10mm (さらには、それ以上) へと拡大し、発熱の影響を考慮した適切な格子定数分布を導入することで、出力をキロワット級 (さらには、それ以上) へと増大することが可能になります。(あるいは、今回開発した PCSEL を単純に 2 次元アレイ化することでも同様の効果が期待されます。) こうして、図 5 に示すように、いよいよ、既存の大型レーザーを一新し、スマート製造分野におけるゲームチェンジを起こすことが可能になるものと期待されます。フォトニック結晶構造を、今回の設計のままで、面積を拡大する (あるいはアレイ化する) と、高次モードが出現し、ビーム品質が劣化しますが、面積拡大によるパワー増大で相殺可能なため、輝度 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) が維持可能となります。なお、直径 10mm (あるいはそれ以上) において、さらに、フォトニック結晶構造の微調整を行い、結合係数 R , l , μ の値をさらに適切に制御すると、基本モード動作を維持したまま、キロワット級 (あるいはそれ以上の出力) 動作も期待出来ます。この場合、大型レーザーをも凌駕する完全単一モード、輝度 $10\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 以上をもつ半導体レーザーの実現が期待されます。このような究極の PCSEL が実現出来ると、加工応用のみならず、宇宙応用 (宇宙セイルの推進用光源)、核融合のための光源、EUV 露光装置の励起光源など、新たな分野への活用が視野に入るものと期待されます。

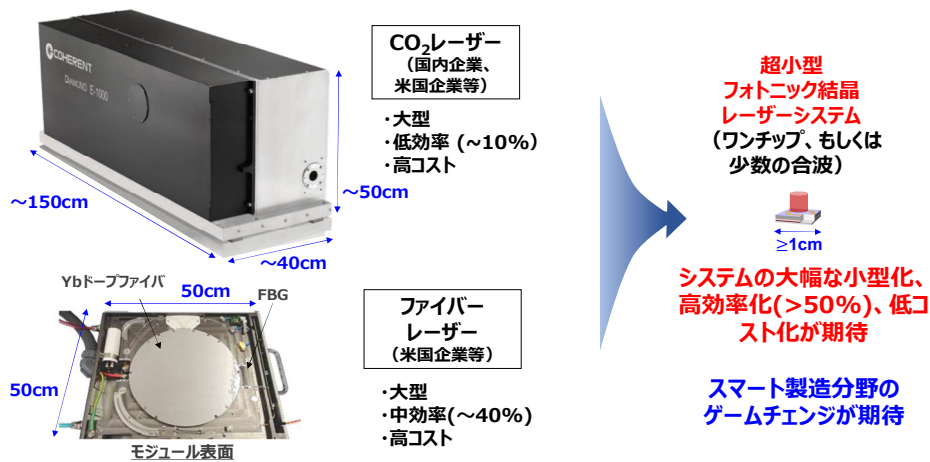


図 5. スマート製造分野のゲームチェンジのイメージ。今回、実現した PCSEL と同じ設計のフォトニック結晶構造を用いて、面積拡大 (≧1cm) を行い、動作時の温度上昇を考慮した格子定数分布を導入することで、キロワット級 (さらには、それ以上の光出力) をもつ PCSEL の実現が期待されます。(あるいは、今回開発した PCSEL を単純に 2 次元アレイ化することでも同様の効果が期待されます。) なお、面積拡大 (あるいはアレイ化) により、ビーム品質が劣化しても、パワー増大効果で相殺出来、輝度は、 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ をそのまま維持することが可能となります。これにより、スマート製造分野において、大型レーザーの一新、すなわち、ゲームチェンジが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

- ・内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術 (管理法人：量子科学技術研究開発機構)：研究課題「フォトニック結晶レーザーに係る研究開発」(研究責任者 野田進) (2018 年度から 2022 年度)。
- ・日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別推進研究「究極の光デバイス実現に向けた非エルミート・ナノフォトニクスの開拓」(研究代表者 野田進) (22H04915) (2022 年度から 2026 年度)。

<用語解説>

注1) 2次元フォトニック結晶 (= 光波長程度の周期で、2次元屈折率分布をもたせた光ナノ構造) を内蔵した半導体レーザー。フォトニックバンド構造の特異点 (Γ 点) において、大面積で安定したレーザー発振が可能になることを、1999年に京都大学が見出したことに端を発するもの。下記の注2)-注4)のプレス発表にも、この5年間程度の進展の様子が示されています。

注2) プレス発表「新たなフォトニック結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功 - 来たるべき超スマート社会におけるスマート製造やスマートモビリティに貢献 -」を参照。

[https://www.kyoto-](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf)

[u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2018documents181218_101.pdf)

注3) プレス発表「フォトニック結晶レーザーを搭載した LiDAR の開発に世界で初めて成功 - 来たるべき超スマート社会におけるスマートモビリティの発展に貢献 -」を参照。

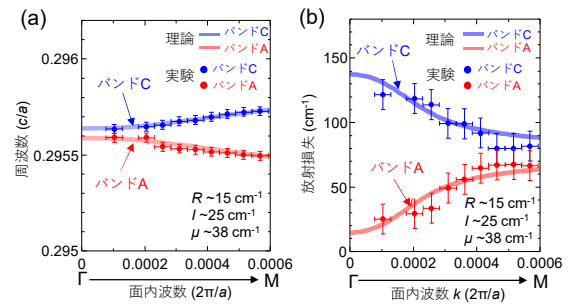
[https://www.kyoto-](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf)

[u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf](https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2020documents200716_101.pdf)

注4) プレス発表「100W~1kW 級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計指針の確立 - 超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて -」を参照。

https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/news/topics/research/20220706_gaiyou

注5) 結合係数の大きさは、フォトニック結晶による光の回折効果を反映して、周波数（フォトニックバンド構造）及び放射損失の面内波数依存性に表れ、これらから実験的に評価が可能です。角度を変えながらレーザー発振が生じる前の放射光に対する発光スペクトルを測定し、その中心波長から周波数、発光線幅から放射損失をそれぞれ評価することができ、その結果を右図(a),(b)に示します。なおここでは、放射損失が小さくレーザー発振に利用するバンドAと、それと対をなすバンドであるバンドCについて示しています。実験値を示すプロットに対して、理論曲線（実線）によるフィッティングを行うことで、結合係数は $R \sim 15 \text{ cm}^{-1}$ 、 $I \sim 25 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\mu \sim 38 \text{ cm}^{-1}$ と求められました。



バンド構造(a)と放射損失(b)の面内波数依存性の測定による結合係数の評価。

<研究者のコメント>

CO₂レーザーやファイバーレーザーなどの大型レーザーに匹敵する高輝度半導体レーザーの実現は、フォトニクスやレーザーに関わる研究者の長年の夢と言っても過言ではありません。フォトニック結晶レーザー（PCSEL）を1999年に発明して以来、長年の研究により輝度増大に取り組んできましたが、今回、大型レーザーに匹敵する輝度（ $1 \text{ GW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ ）を達成出来たことを大変嬉しく思います。今後は、本研究で開発した高輝度フォトニック結晶レーザーの出力の更なる増大によるスマート製造分野におけるゲームチェンジ、さらには、より一層の輝度増大に取り組み、様々な分野に波及効果、ゲームチェンジをもたらすことを目指していきます。（野田）

<論文タイトルと著者>

タイトル：High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser (和訳：スケラブルな高輝度単一モード連続動作フォトニック結晶レーザー)

著者：Masahiro Yoshida †, Shumpei Katsuno †, Takuya Inoue †, John Gellata, Koki Izumi, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Susumu Noda*

(†: These authors are contributed equally to this work.)

(*: Corresponding author: S. Noda)

掲載誌：Nature

DOI： <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06059-8>